

Г. И. ИЩЕНКО, Р. М. СТРЕЛЬЧУК

## О ФИНИШНОЙ ОБРАБОТКЕ РАБОЧЕЙ ЧАСТИ ЛОПАТОК ПАРОВЫХ ТУРБИН

Для обеспечения задач по внедрения в конструкцию паровых турбин новых лопаток из титановых сплавов с современной геометрией, которая позволяет повысить экономичность паротурбинных установок, необходимо повышение технического уровня их производства. Совершенствование технологии изготовления лопаток, изыскание новых более совершенных методов финишной обработки, обеспечение норм точности изготовления частей лопаток, а также снижение шероховатости поверхностей являются весьма актуальными задачами как с точки зрения повышения надежности и экономичности турбин, так и с точки зрения снижения их себестоимости. Рассмотрено влияние режимов шлифования и характеристик абразивного инструмента на выходные параметры плоского шлифования рабочей части лопаток паровых турбин из титанового сплава. Для оценки оптимальности процесса при плоском шлифовании периферией круга использовали показатели производительности обработки, относительного расхода шлифовального круга, удельной себестоимости обработки, шероховатости обработанной поверхности, контактной температуры резания. Оптимальность процесса шлифования определялась с применением методики многофакторного планирования эксперимента.

**Ключевые слова:** технология изготовления лопаток; финишная обработка; титановые сплавы; производительность; шероховатость; методика многофакторного планирования эксперимента.

Г. І. ІЩЕНКО, Р. М. СТРЕЛЬЧУК

## ПРО ФІНІШНУ ОБРОБКУ РОБОЧОЇ ЧАСТИНИ ЛОПАТОК ПАРОВИХ ТУРБІН

Для забезпечення завдань по впровадженню в конструкцію парових турбін нових лопаток з титанових сплавів із сучасною геометрією, яка дозволяє підвищити економічність паротурбінних установок, необхідно підвищення технічного рівня їх виробництва. Удосконалення технології виготовлення лопаток, пошук нових більш досконалих методів фінішної обробки, забезпечення норм точності виготовлення частин лопаток, а також зниження шорсткості поверхонь є дуже актуальними завданнями як з точки зору підвищення надійності і економічності турбін, так і з точки зору зниження їх собівартості. Розглянуто вплив режимів шліфування і характеристик абразивного інструменту на вихідні параметри плоского шліфування робочої частини лопаток парових турбін з титанового сплаву. Для оцінки оптимальності процесу при плоскому шліфуванні периферією круга використовували показники продуктивності обробки, відносної витрати шліфувального круга, питомої собівартості обробки, шорсткості обробленої поверхні, контактної температури різання. Оптимальність процесу шліфування визначалася із застосуванням методики багатофакторного планування експерименту.

**Ключові слова:** технологія виготовлення лопаток; фінішна обробка; титанові сплави; продуктивність; шорсткість; методика багатофакторного планування експерименту.

G. I. ISHCENKO, R. M. STRELCHUK

## ABOUT FINISHING THE WORKING PIECE OF STEAM TURBINES

To ensure the tasks of introducing new blades of titanium alloys with modern geometry into the design of steam turbines, which makes it possible to increase the economics of steam turbine units, it is necessary to increase the technical level of their production. Improving the technology of making blades, finding new improved methods for finishing, ensuring the accuracy standards for the manufacture of blade parts, and reducing the surface roughness are very urgent tasks both in terms of increasing reliability and economy of turbines, and in terms of reducing their cost. The influence of grinding modes and characteristics of the abrasive tool on the output parameters of the flat grinding of the working part of the blades of steam turbines made of titanium alloy is considered. To assess the optimality of the process for flat grinding, the periphery of the circle was used to measure the processing capacity, the relative consumption of the grinding wheel, the specific cost of processing, the roughness of the treated surface, the contact cutting temperature. The optimality of the grinding process was determined using the multifactor design of the experiment.

**Key words:** blade technology; finishing; titanium alloys; performance; roughness; method of multifactorial experiment planning.

**Введение.** Энергорынок на территории Украины начал развиваться с начала семидесятых годов. Украина, в силу ее потенциала и географического положения, играла в советском стратегическом планировании развития энергетики особую роль. За сравнительно короткий период времени в Украине были сооружены пять АЭС, преимущественно блоками по 1000МВт, притом вблизи границ с бывшими странами СЭВ. Эти станции обеспечивали не только внутренние потребности Украины, но и участвовали в обеспечении поставок электроэнергии в бывшие страны – члены СЭВ, потребности которых достигали суммарно 4500-5000 МВт. Строительство атомных станций происходило в ущерб модернизации, реконструкции и развития тепловых электростанций. В силу этого, на сегодняшний день тепловая энергетика Украины находится в весьма сложном положении не только из-за дефицита энергоресурсов, но и по причине

физического и морального износа основных фондов.

Выполненные маркетинговые исследования показали, что на тепловых электростанциях Украины работает 91 паровая турбина разной мощности, в том числе 48 турбин производства ОАО «Турбоатом», 43 турбины производства «ЛМЗ» (г. Санкт-Петербург, Россия), кроме того, 17 паровых турбин мощностью 220 МВт и 1000 МВт работают на АЭС Украины и стран дальнего зарубежья (Финляндии, Венгрии, Болгарии). Значительная часть этих турбин: 91,3% мощностью 150 и 200 МВт; 92,7% мощностью 300 МВт – находятся в эксплуатации от 20 до 40 лет, их лопаточные аппараты отработали свой расчетный, продленный ресурс или приближаются к этому и требуют модернизации и замены. Замена и модернизация этих турбин предусмотрены Энергетической стратегией Украины на период до 2030 года. Замена турбин должна проводиться на

современном техническом уровне с повышением их мощности и внутреннего КПД. Это достигается, в первую очередь, за счет внедрения в конструкцию турбин новых лопаток с современной геометрией, которая позволяет повысить экономичность паротурбинных установок на 4-5% и сделать их конкурентоспособными по этому параметру на внешнем и внутреннем рынках.

Для обеспечения этих задач настоятельно необходимо повышение технического уровня механообрабатывающего производства лопаток.

Лопаточный аппарат паровых турбин характеризуется, кроме сложности конструкции, большой трудоемкостью изготовления. В среднем его трудоемкость составляет 30-35% общей трудоемкости изготовления турбины. Поэтому совершенствованию операций изготовления элементов лопатки (рабочего профиля, хвоста и головки) уделялось ранее и в настоящее время повышенное внимание технологов и исследователей. Одной из наиболее важных проблем энергетического машиностроения является совершенствование конструкции паровых и гидравлических турбин.

Лопаточный аппарат является самой ответственной и наиболее дорогой частью турбины и составляет 25-30% общей трудоемкости производства турбин. К проектированию пера лопатки предъявляются повышенные требования по точности и качеству. Точность изготовления рабочей части составляет 0,01 мм. При проектировании закладывается точность расчета 0,001 мм. Вторым важным требованием является качество поверхности (шероховатость поверхности Ra 0,32-0,16 мкм - близка к зеркальной поверхности).

Для увеличения срока службы лопаток турбин предложен вариант их изготовления из сплава на основе титана. Совершенствование технологии изготовления лопаток, изыскание новых более совершенных методов финишной обработки, обеспечение норм точности изготовления частей лопаток, а также снижение шероховатости поверхностей являются весьма актуальными задачами как с точки зрения повышения надежности и экономичности турбин, так и с точки зрения снижения их себестоимости [12].

Основная причина плохой обрабатываемости шлифованием сплавов на основе титана объясняется высокой адгезионной активностью металла к абразивному материалу [8]. Если в качестве критерия интенсивности адгезионного взаимодействия пары абразивный материал-металл рассматривать количество абразивного материала, перенесенного при шлифовании на поверхность металла [10], то среди d-переходных элементов по данному критерию титановый сплав относится к группе наиболее активных металлов [6]. Именно адгезионная активность титана и сплавов на его основе является причиной интенсивного износа абразивного инструмента, большой силы резания и шероховатости обработанной поверхности [7]. При шлифовании время взаимодействия пары абразив-металл существенно

выше, что увеличивает негативное влияние адгезионного взаимодействия на показатели процесса. Использование специального абразивного инструмента, оптимизация режимов обработки и постоянная правка круга позволяют снизить интенсивность контактных процессов при шлифовании [11].

В данном исследовании рассмотрено влияние режимов шлифования и характеристик абразивного инструмента на выходные параметры плоского шлифования заготовок лопаток турбин из титанового сплава.

**Условия и порядок проведения исследований и техника эксперимента.** Сравнительные технологические испытания выполняли на экспериментальной установке, смонтированной на базе плоскошлифовального станка мод. 3Е711ВФ2. Для измерения силы прижима  $P_{с.пр}$  и средней контактной температуры  $T$  использовали автоматизированное рабочее место (АРМ), которое включает полусинусоидальную термопару для измерения средней контактной температуры, закрепленную в универсальном динамометре УДМ-100. УДМ-100 устанавливают на столе плоскошлифовального станка 3Е711ВФ2. Термопара и УДМ-100 подключены с помощью кабеля интерфейсного к восьмиканальному измерительному усилителю, соединенному с помощью интерфейсного кабеля с восьмиканальным аналого-цифровым преобразователем (АЦП), который непосредственно подключается к персональному компьютеру, удовлетворяющему требованиям операционной системы Windows XP с использованием специальной программы.

Применяли схему плоского шлифования периферией круга, которая осуществлялась кругами прямого профиля ПП-200×40×32 производства ПАО "ТУРБОАТОМ" (СТП 880- 2017) на керамической связке К5 с зёрнами из электрокорунда нормального марки 15А, диапазоном зернистости 32 мкм, 16 мкм и 8 мкм, и номеров структуры – 4 ( $V_z=54\%$ ), 9 ( $V_z=44\%$ ), 14 ( $V_z=34\%$ ). Перед испытаниями шлифовальные круги проверяли на соответствие их основным геометрическим параметрам и требованиям ГОСТ 2424. Величина допускаемого дисбаланса шлифовальных кругов не превышала значений, определяемых ГОСТ 3060 и ГОСТ 19534. Твердость и механическая прочность кругов соответствовали требованиям ГОСТ 12.3.028. Твердость контролировали акустическим методом с помощью прибора «Звук-203М», механическую прочность кругов определяли на стенде «СИП-800». Перед установкой на испытательный стенд все круги проверяли на наличие сколов и трещин. В процессе сравнительных испытаний проводили статическую балансировку шлифовальных кругов на стенде. Шлифовальные круги предварительно правились и прирабатывались в течение 2-3 минут. После испытаний диаметр шлифовального круга контролировали микрометром МК 200 (ГОСТ 4381, цена деления 0,01 мм, диапазон измерения 175...200 мм, погрешность измерения  $\pm 0,002$  мм).

Режимы резания проводили при следующих параметрах: силу прижима  $P_{с.пр}$  варьировали в пределах 25, 35, 45 Н, скорость круга  $V$  варьировали в пределах 25, 35, 45 м/с.

Исследование проводили на образцах из материала – титанового сплава ВТ3-1 с пределом прочности  $\sigma_B=930$  МПа. Образцы для проведения испытаний изготавливали из одной партии материалов, которые соответствовали требованиям стандартов по химическому составу и физико-механическим свойствам. Рассеивание предела прочности образцов не превышало + 3,5 %. Перед началом каждой серии опытов партию заготовок шлифовывали в один размер с допуском по 7 квалитету и шероховатостью по параметру  $R_a < 1,6$  мкм. Отклонение шероховатости поверхности в партии образцов не превышало 8 ... 10 %. Размеры образцов соответствовали размерам  $100 \times 80 \times 15$  мм.

Размеры образцов до и после обработки контролировали универсальными инструментами: штангенциркулем ШЦ-II-250-0,05 (ГОСТ 166, цена деления 0,05 мм, диапазон измерения 0...250 мм, погрешность измерения + 0,025 мм); микрометром МК25 (ГОСТ 4381, цена деления 0,01 мм, диапазон измерения 0...25 мм, погрешность измерения  $\pm 0,002$  мм).

Состояние рельефа обработанной поверхности исследовали на растровом двухлучевом электронном микроскопе Versa 3D LoVac, соединившего в себе последние мировые достижения в области физических методов контроля качества поверхности. Микроскоп позволяет проводить электронномикроскопические исследования состояния рельефа в широком диапазоне увеличений с высокой разрешающей способностью и контрастностью изображения. Поворотный предметный столик позволяет вращать объект в горизонтальной плоскости на  $360^\circ$  и наклонять в вертикальной на угол от  $-15^\circ$  до  $+90^\circ$  с автоматическим позиционированием анализируемого участка поверхности. Исследование химического состава выполнено на этом же приборе методом локального микроанализа.

Среднее арифметическое отклонение профиля шлифованной поверхности  $R_a$  и другие параметры шероховатости измеряли на профилометре SURTRONIC 3+ фирмы TAYLOR – HOBSON (рис. 1).

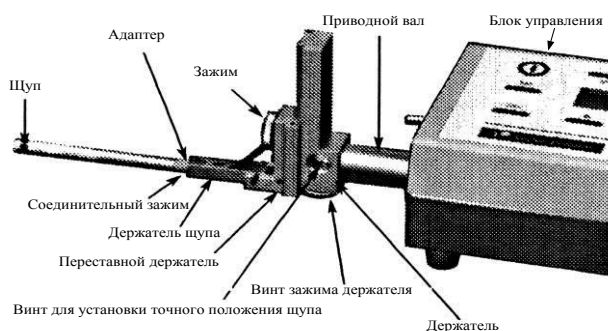


Рис.1 - Общий вид прибора Surtronic 3+

Для наглядной интерпретации результатов измерений снимались соответствующие профилограммы исследуемых объектов; они были получены на универсальной измерительной станции HOMMELWERKE T8000, общий вид которой представлен на рис. 2.

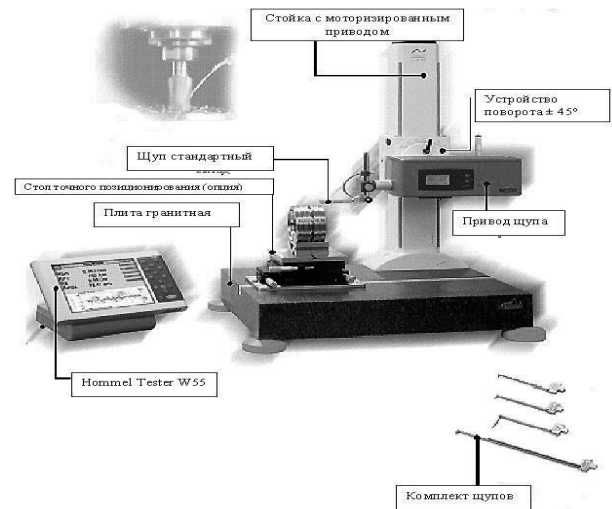


Рис.2 - Общий вид универсальной измерительной станции HOMMELWERKE T8000

Универсальная измерительная станция HOMMELWERKE T8000 с моторизированным перемещением по вертикали предназначена для измерения шероховатости, профиля и волнистости поверхности сложных, криволинейных поверхностей. В ней встроен принтер для распечатки результатов измерений и профилограмм шероховатости поверхности. К особенностям станции относится возможность позиционирования щупа под  $90^\circ$  к направлению подачи.

Для оценки оптимальности процесса при плоском шлифовании периферией круга использовали перечисленные ниже параметры:

1. Производительность обработки –  $Q$  (мм<sup>3</sup>/мин),
2. Относительный расход шлифовального круга –  $q$  (мг/г),
3. Удельная себестоимость обработки –  $C$  (грн/см<sup>3</sup>),
4. Шероховатость обработанной поверхности –  $R_a$  (мкм),
5. Контактная температура резания –  $T$  (°C).

**Математическое планирование экспериментов, состав и количество опытов.** Оптимальность процесса шлифования определялась с применением методики многофакторного планирования экспериментов, позволяющей описать процесс в виде уравнений регрессии, т. е. получить математические модели параметров оптимизации. При этом необходимо знать область изменения независимых переменных, соответствующую наилучшему значению изучаемого параметра оптимизации [1, 3], что дает возможность правильно выбрать интервалы варьирования факторов, т. е. определить наиболее рациональный диапазон условий

практического применения кругов.

Ввиду того, что основным параметром оптимизации являлась удельная себестоимость обработки, находилась область факторного пространства с минимальным ее значением. При этом ограничение условий шлифования проводилось по качественным показателям процесса – шероховатости обработанной поверхности и контактной температуре. Поэтому интервалы варьирования факторов выбирались в диапазоне условий шлифования, обеспечивающих наименьшую удельную себестоимость обработки и наилучшие показатели обработанной поверхности.

Исследование факторного пространства, прилежащего к оптимуму, проводилось с помощью планирования второго порядка, так как линейное уравнение регрессии не может адекватно описывать поверхность отклика из-за крутизны гиперплоскостей факторного пространства и возможной значимости эффектов взаимодействия факторов и квадратичных эффектов.

В настоящее время математическая теория планирования экспериментов предлагает большое количество видов планов, а, следовательно, и матриц планирования. Поэтому определенное значение приобретает выбор плана, наиболее приемлемого для конкретных задач. Наиболее широко применяемыми в настоящее время планами второго порядка являются следующие: ортогональные, рототабельные, и планы, близкие к Д-оптимальному.

Использование ортогональных и рототабельных планов при исследовании работоспособности шлифовальных кругов связано с определенными затруднениями, так как часто бывает невозможно реализовать уровни для дискретных значений факторов (например, зернистость), кодированное значение которых дробное (например, 1,125 или 1,68).

При исследовании процесса шлифования наибольший интерес представляют планы, близкие к Д-оптимальным, построенные на кубе, поскольку в данном случае факторы варьируются только на трех уровнях, причем верхний и нижний уровни симметричны относительно центра плана и имеют целочисленные значения [5]. Таким образом, предпочтение было отдано плану, близкому к Д-оптимальному и обозначенному в литературе как  $B_4$  для 4-х факторов: сила прижима  $P_{с.пр}$ , скорости резания  $V$ , зернистости  $Z$  и № структуры круга (объем зерен  $V_z$ , %).

Необходимо отметить, что поверхность отклика наиболее целесообразно описывать полным уравнением второго порядка [6]:

$$\hat{y} = b_0 + \sum_{i=1}^K b_i x_i + \sum_{1 \leq i < j \leq K} b_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^K b_{ii} x_i^2, \quad (6)$$

где:  $\hat{y}$  – выборочная оценка изучаемой функции;  $b_0$ ,  $b_i$ ,  $b_{ij}$ ,  $b_{ii}$  – выборочные коэффициенты регрессии;  $x_i$ ,  $x_j$  – независимые переменные;  $K$  – общее число независимых переменных.

Коэффициенты полинома (уравнения регрессии)

рассчитывались по офисной программе MS Excel. Гипотеза об адекватности модели проверялась по критерию Фишера:

$$F = \frac{S_{ad}^2}{S_y^2}, \quad (7)$$

где  $S_{ad}^2$  – дисперсия адекватности,  $S_y^2$  – дисперсия воспроизводимости.

Дисперсия адекватности  $S_{ad}^2$  рассчитывалась по формуле:

$$S_{ad}^2 = \frac{\sum_{i=1}^N n(\bar{y} - \hat{y})^2}{N - \lambda}, \quad (8)$$

где  $\bar{y}$  – среднее значение отдельного наблюдения,  $\hat{y}$  – расчетное значение критерия по уравнению регрессии,  $n$  – число повторений данного опыта,  $N$  – общее число опытов,  $\lambda$  – число коэффициентов уравнения.

Дисперсия воспроизводимости  $S_y^2$  определяется из выражения:

$$S_y^2 = \frac{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^n (y_{ij} - \bar{y}_i)^2}{N(n-1)}, \quad (9)$$

где  $N$  – общее число опытов,  $n$  – число повторений данного опыта,  $y_{ij}$  – результаты отдельного наблюдения,  $\bar{y}_i$  – среднее арифметическое значение критерия.

Найденное из уравнения (7) значение  $F$  сравнивалось с табличным. Если  $F_{табл} > F_{расч}$ , то с выбранной доверительной вероятностью уравнение считалось адекватным, в противном случае модель не адекватна (табл.1). Табличное значение  $F$  при доверительной вероятности 0,95 составляет 2,32 [2].

Таблица 1 - Статистические характеристики уравнений регрессии (4.11 ... 4.13)

Параметры оптимизации	$S_{ad}^2$	$S_y^2$	$F_{расч}$	$F_{табл.}$
Q	1132,59	541,11	2,09	2,32
q	3,17	2,38	1,33	2,32
C	18581,90	13739,66	1,35	2,32
Ra	0,005	0,008	0,62	2,32
T	2698,81	1336,53	2,02	2,32

Значимость коэффициентов уравнения регрессии определялась для оценки влияния отдельных факторов на параметры оптимизации. Для того, чтобы не вызывать искажения модели, отсеив незначимых факторов не проводился. С целью уменьшения ошибок экспериментов проводилась проверка однородности дисперсии по критерию Кохрена:

$$G = \frac{S_{\max}^2}{\sum_{i=1}^N S_i^2}, \quad (10)$$

где  $S_{\max}^2$  – максимальная дисперсия в эксперименте,  $\sum_{i=1}^N S_i^2$  – сумма всех дисперсий.

Расчетные значения критерия Кохрена (табл. 2) меньше табличного значения  $G_{табл} = 0,2354$  [9], поэтому дисперсии считались однородными.

Таблица 2 - Расчетные значения критерия Кохрена

Параметры оптимизации	$G_{расч.}$	$G_{табл}$
Q	0,092	0,2354
q	0,196	0,2354
C	0,153	0,2354
Ra	0,082	0,2354
T	0,128	0,2354

После проведения канонических преобразований анализ поверхности отклика осуществляли с помощью двумерного сечения. Для анализа влияния отдельных факторов на показатели работоспособности кругов строились однофакторные зависимости (расчет канонических преобразований и однофакторные зависимости были получены по программе MS Excel). Значение факторов, уровней и интервалов их варьирования для планируемого эксперимента второго порядка по плану (B4), близкому к Д-оптимальному, приведено в табл. 3. Матрица планирования и результаты экспериментов приведены в табл. 4.

Таблица 3 - Обозначение факторов, уровней и интервалов их варьирования

Факторы	$Pc, н$	$V, м/с$	$Z, мкм$	структура круга № (Vз, %)
Условное обозначение факторов	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$
Нулевой уровень (0)	35	35	20	9 (44)
Верхний уровень (+)	45	45	32	4 (54)
Нижний уровень (-)	25	25	8	14 (34)
Интервал варьирования	10	10	12	5 (10)

После расчетов коэффициентов получены следующие уравнения регрессии.

1. Для производительности:

$$y_Q = 640,22 + 116,19x_1 + 74,52x_2 - 103,01x_3 + 99,70x_4 + 20,46x_1x_2 + 16,60x_1x_3 + 17,34x_1x_4 - 44,90x_2x_3 + 31,74x_2x_4 - 77,37x_3x_4 - 34,66x_1^2 - 131,79x_2^2 + 36,86x_3^2 + 88,89x_4^2. \quad (11)$$

2. Для относительного расхода шлифовального круга:

$$y_q = 7,65 - 2,91x_1 - 1,99x_2 + 0,27x_3 + 3,19x_4 + 0,72x_1x_2 - 0,58x_1x_3 - 1,58x_1x_4 - 0,57x_2x_3 - 1,06x_2x_4 - 2,38x_3x_4 - 3,05x_1^2 - 0,18x_2^2 + 1,58x_3^2 + 2,58x_4^2. \quad (12)$$

3. Для удельной себестоимости обработки:

$$y_C = 594,71 - 229,31x_1 - 132,57x_2 + 59,99x_3 - 21,41x_4 + 52,46x_1x_2 - 39,17x_1x_3 - 8,08x_1x_4 - 36,67x_2x_3 - 12,42x_2x_4 - 183,54x_3x_4 - 51,28x_1^2 + 88,38x_2^2 + 138,22x_3^2 - 19,62x_4^2. \quad (13)$$

4. Для шероховатости обработанной поверхности:

$$y_{Ra} = 0,848 + 0,103x_1 - 0,084x_2 + 0,146x_3 - 0,118x_4 - 0,003x_1x_2 + 0,030x_1x_3 + 0,030x_1x_4 - 0,015x_2x_3 - 0,034x_2x_4 + 0,061x_3x_4 + 0,006x_1^2 + 0,079x_2^2 + 0,054x_3^2 + 0,233x_4^2. \quad (14)$$

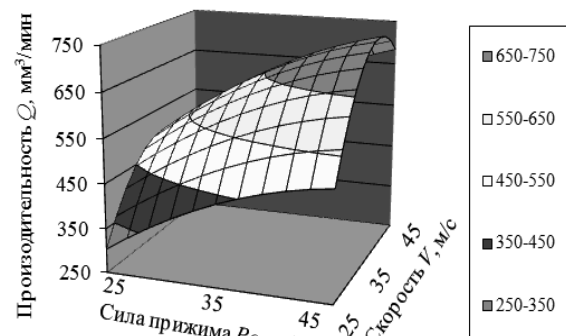
5. Для контактной температуры резания:

$$y_T = 768,46 + 133,97x_1 + 67,01x_2 - 104,36x_3 + 115,68x_4 + 15,68x_1x_2 - 10,38x_1x_3 + 8,79x_1x_4 - 47,23x_2x_3 + 25,67x_2x_4 - 81,29x_3x_4 - 48,04x_1^2 - 172,04x_2^2 + 61,13x_3^2 + 100,63x_4^2. \quad (15)$$

Таблица 4 - Матрица планирования и результаты экспериментов

№№ опытов	Факторы				Значения параметров оптимизации				
	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$\bar{Q}$ , мм3/мин	$\bar{q}$ , мг/г	$\bar{C}$ , грн/с м3	$\bar{Ra}$ , мкм	$\bar{T}$ , °C
1	+	+	+	+	732	2,69	305	1,366	902
2	-	+	+	+	428	9,88	585	0,975	522
3	+	-	+	+	540	6,63	377	1,609	673
4	-	-	+	+	375	19,87	1098	1,317	481
5	+	+	-	+	1233	6,57	416	0,902	1306
6	-	+	-	+	849	14,65	866	0,683	997
7	+	-	-	+	858	11,78	700	1,024	1028
8	-	-	-	+	578	21,32	1244	0,927	706
9	+	+	+	-	582	4,68	584	1,414	684
10	-	+	+	-	382	8,06	1110	1,341	456
11	+	-	+	-	562	7,24	916	1,609	702
12	-	-	+	-	369	13,42	1633	1,366	452
13	+	+	-	-	747	1,94	366	1,219	893
14	-	+	-	-	478	2,86	621	1,170	554
15	+	-	-	-	535	1,74	406	1,366	624
16	-	-	-	-	341	3,96	774	1,219	380
17	+	0	0	0	656	3,83	410	1,024	794
18	-	0	0	0	555	5,37	677	0,683	646
19	0	+	0	0	543	6,92	637	0,853	565
20	0	-	0	0	474	8,02	729	1,000	627
21	0	0	+	0	574	7,80	665	0,975	699
22	0	0	-	0	780	10,65	801	0,829	960
23	0	0	0	+	828	14,16	792	0,974	975
24	0	0	0	-	630	6,31	358	1,187	763

**Обработка результатов исследования.** На рис.3–14 приведены трехмерные поверхности отклика, позволяющие осуществлять выбор режимов шлифования для производительности обработки, относительного расхода шлифовального круга и удельной себестоимости обработки.

Рис. 3 - Трехмерная поверхность отклика  $Q = f(Pc, V)$ :  $Z=20\text{мкм}$ ; №9

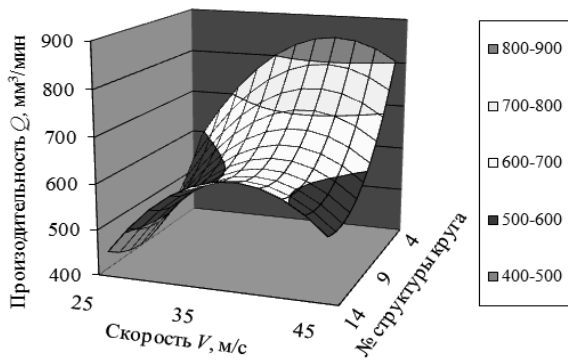


Рис.4 - Трехмерная поверхность отклика  $Q - f(V, №)$ :  
Рс.пр= 35Н; Z=20мкм

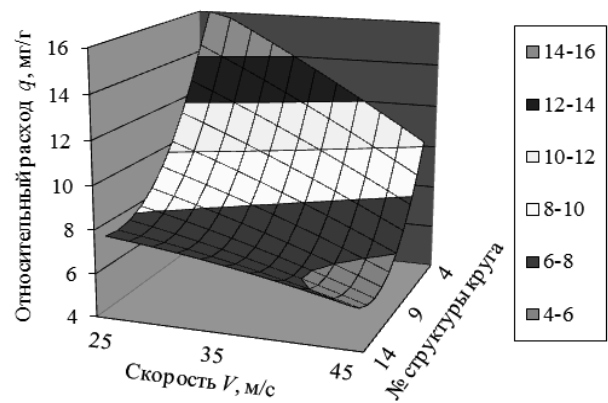


Рис.8 - Трехмерная поверхность отклика  $q - f(V, №)$ :  
Рс.пр= 35 Н; Z=20мкм

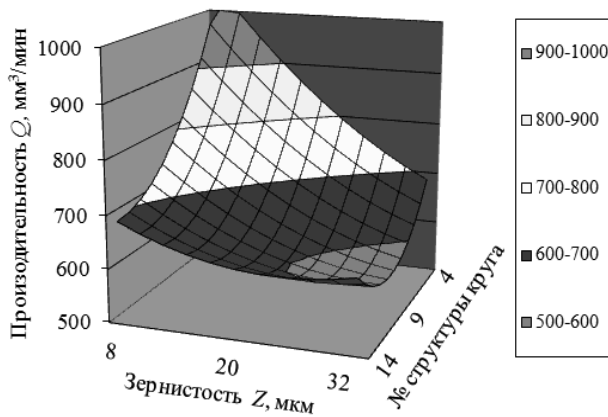


Рис.5 - Трехмерная поверхность отклика  $Q - f(Z, №)$ :  
Рс.пр= 35 Н; V=35м/с

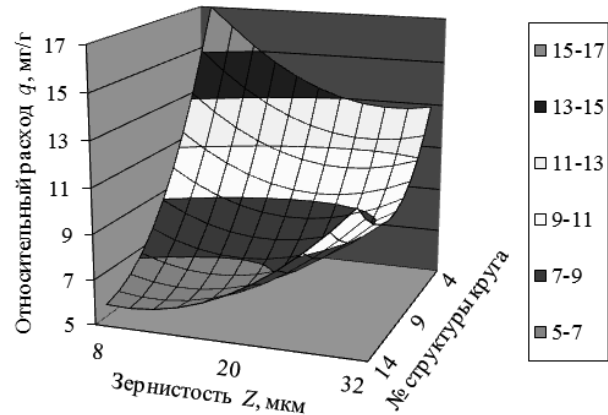


Рис.9 - Трехмерная поверхность отклика  $q - f(Z, №)$ :  
Рс.пр= 35 Н; V=35м/с

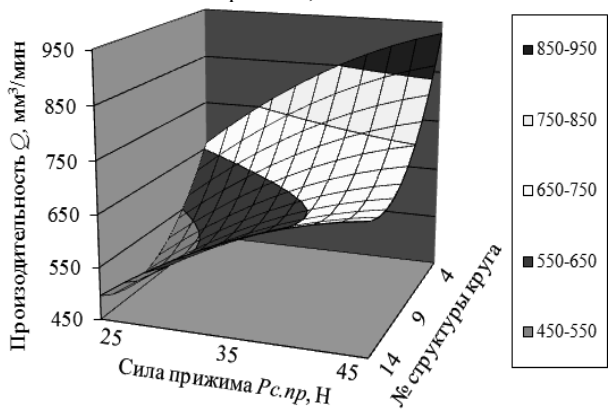


Рис.6 - Трехмерная поверхность отклика  $Q - f(P_{с.пр}, №)$ :  
Z=20мкм; V=35м/с

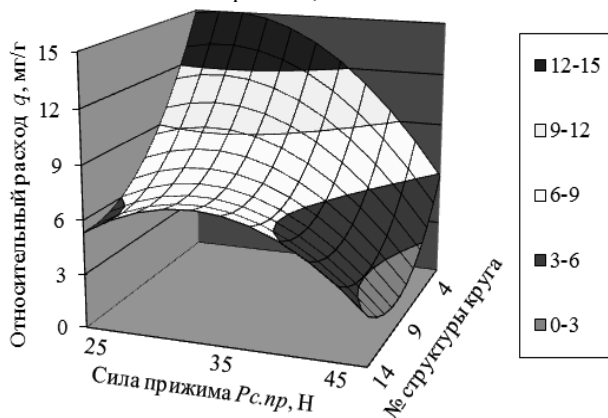


Рис.10 - Трехмерная поверхность отклика  $q - f(P_{с.пр}, №)$ :  
Z=20мкм; V=35м/с

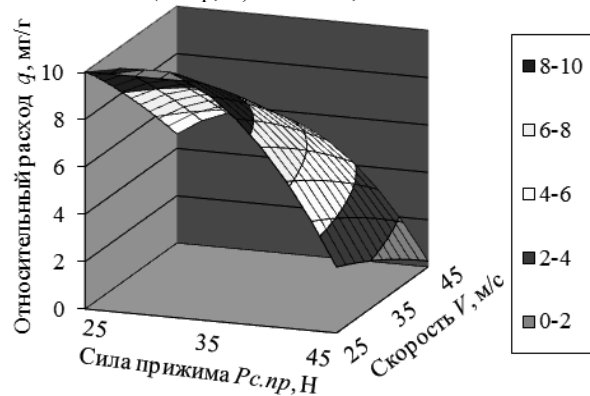


Рис.7 - Трехмерная поверхность отклика  $q - f(P_{с.пр}, V)$ :  
Z=20мкм; №9

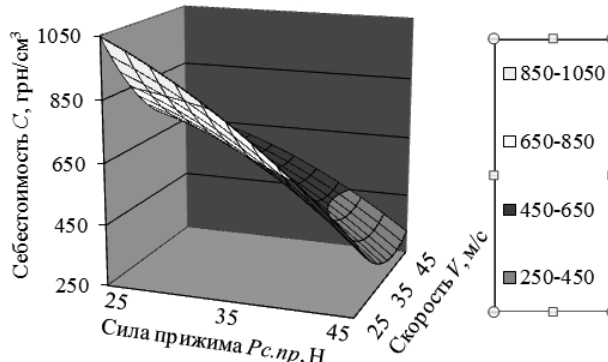


Рис.11 - Трехмерная поверхность отклика  $C - f(P_{с.пр}, V)$ :  
Z=20мкм; №9

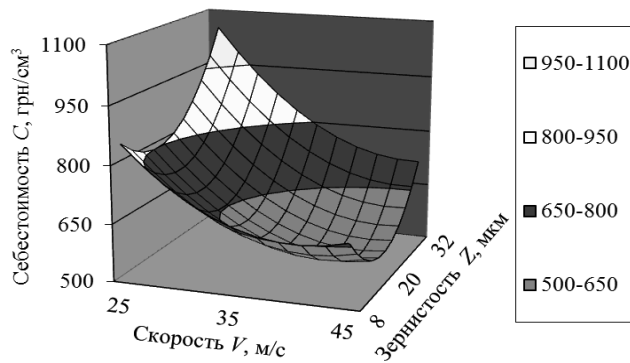


Рис. 12 - Трехмерная поверхность отклика  $C - f(V, Z)$ :  
 $P_{с.пр}=35$  Н; №9

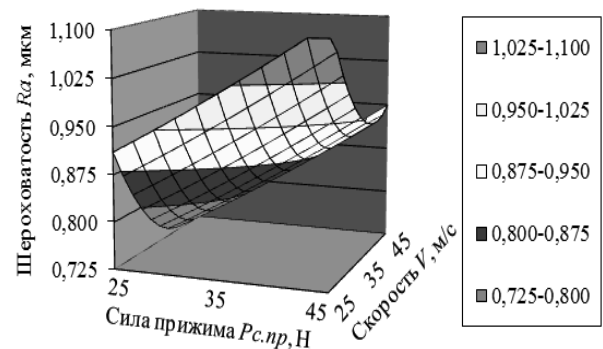


Рис. 15 - Трехмерная поверхность отклика  $Ra - f(P_{с.пр}, V)$ :  
 $Z=20$  мкм; №9

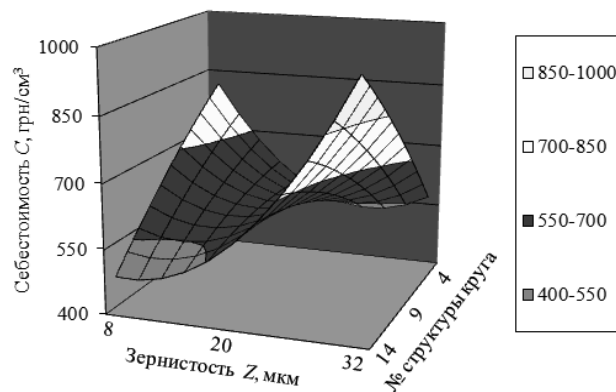


Рис. 13 - Трехмерная поверхность отклика  $C - f(Z, №)$ :  
 $P_{с.пр}=35$  Н;  $V=35$  м/с

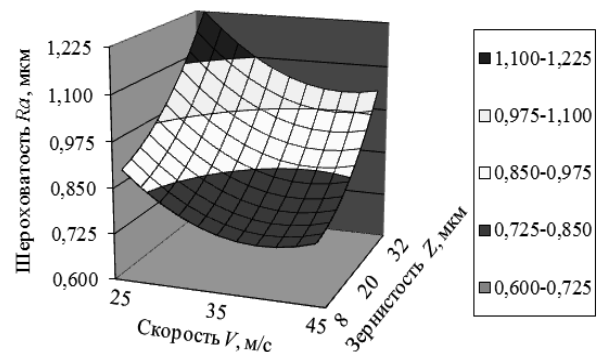


Рис. 16 - Трехмерная поверхность отклика  $Ra - f(V, Z)$ :  
 $P_{с.пр}=35$  Н; №9

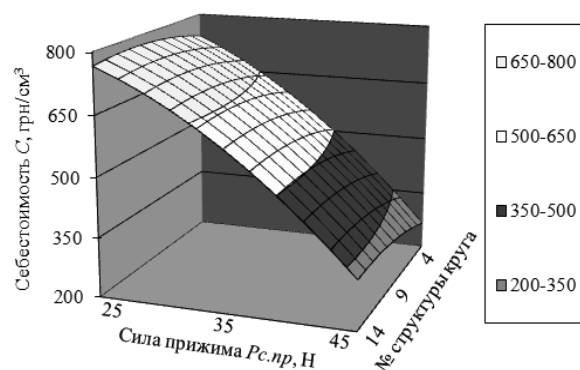


Рис. 14 - Трехмерная поверхность отклика  $C - f(P_{с.пр}, №)$ :  
 $Z=20$  мкм;  $V=35$  м/с

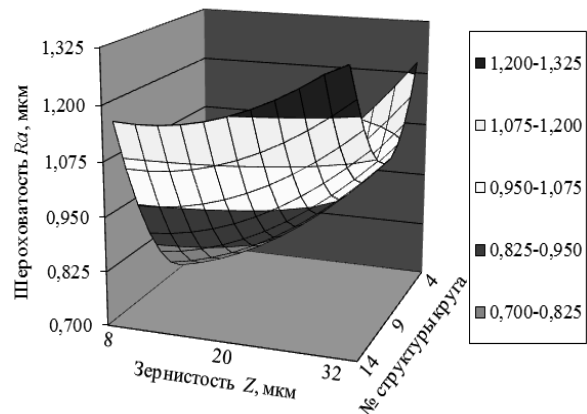


Рис. 17 - Трехмерная поверхность отклика  $Ra - f(Z, №)$ :  
 $P_{с.пр}=35$  Н;  $V=35$  м/с

На рис. 15–20 приведены трехмерные поверхности отклика, позволяющие осуществлять выбор режимов шлифования и характеристик абразивных кругов для оптимизации шероховатости обработки и контактной температуры. Оценка значимости коэффициентов уравнений регрессии и характер расположения линий равного отклика показывают, что режимы шлифования и характеристики абразивных кругов в исследуемом диапазоне существенно влияют на шероховатость поверхности и контактную температуру.

**Выводы.** Увеличение производительности тем больше, чем тверже шлифовальный круг, что можно объяснить повышением так называемой динамической твердости инструмента, обусловленной уменьшением нагрузки на режущие абразивные зерна при увеличении его скорости вращения.

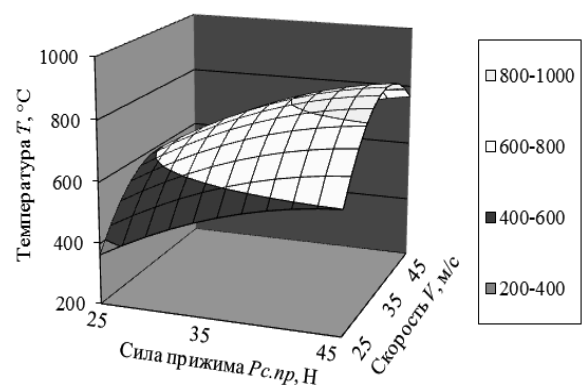


Рис. 18 - Трехмерная поверхность отклика  $T - f(P_{с.пр}, V)$ :  
 $Z=20$  мкм; №9

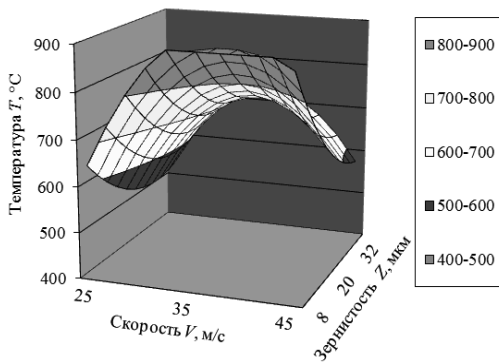


Рис.19 - Трехмерная поверхность отклика  $T = f(V, Z)$ :  
Рс.пр=35 Н; №9

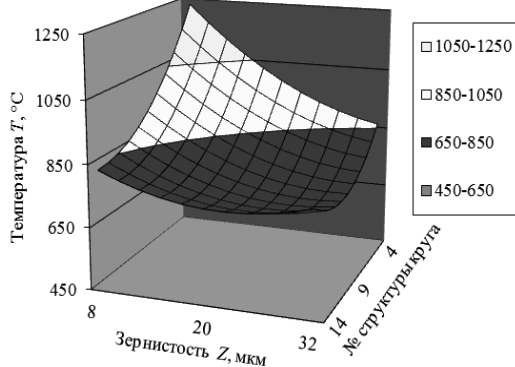


Рис.20 - Трехмерная поверхность отклика  $T = f(Z, №)$ :  
Рс.пр=35 Н;  $V=35$  м/с

Рекомендуется применять для высокопроизводительного шлифования титановых сплавов без использования смазочно-охлаждающих средств высокоструктурные абразивные круги на керамических связках, у которых плотность и твердость должны соответствовать определенному скоростному режиму. Размер абразивных зерен в шлифовальном круге определяется требованиями по производительности процесса и шероховатости обработанной поверхности детали.

#### Список литературы

1. Адлер Ю. П., Маркова Е. В., Грановский Ю. В. Планирование экспериментов при поиске оптимальных условий. - М.: Наука, 1976. - 279 с.
2. Бондарь А. Г., Статюха Г. А. Планирование эксперимента в химической технологии. - К.: Вища школа, 1976. - 184 с.
3. Душинский В. В., Пуховский Е. С., Радченко С. Г. Оптимизация технологических процессов в машиностроении. - К.: Техніка, 1977. - 176 с.
4. Ефимов В. Н. Совершенствование рабочих процессов технологии, методов обработки резанием - важнейший резерв машиностроения. / Ефимов В. Н., Подураев В. Н. // Вестник машиностроения. - 1990. - №12. - С. 3 - 5.
5. Налимов В. В., Чернова Н. А. Статистические методы планирования экстремальных экспериментов. - М.: Наука, 1965. - 340 с.
6. Носенко В.А. Критерий интенсивности взаимодействия обрабатываемого и абразивного материалов при шлифовании /

В.А. Носенко // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2001. № 5. С. 85.

7. Полетаев В.А. Глубинное шлифование лопаток турбин: библиотека технолога / В.А. Полетаев, Д.И. Волков. - М.: Машиностроение, 2009. - 272 с.
8. Саютин Г. И., Носенко В. А. Шлифование деталей из сплавов на основе титана. - М.: Машиностроение, 1987. - 80 с.
9. Семко М. Ф., Узунян М. Д., Юфа Э.П. Экономическое обоснование выбора алмазного круга. - Х.: Прапор, 1971. - 100 с.
10. Силин С.С. Особенности глубинного шлифования титановых сплавов // С.С. Силин, Б. Н. Леонов, В. А. Хрульков, А. В. Лобанов, В. А. Полетаев, Э. Б. Данченко // Вестник машиностроения, 1989, №1. С. 43-45.
11. Старков В.К. Шлифование высокопористыми кругами. - М.: Машиностроение, 2007. - 688 с.
12. Савчук, В.И. Технологические возможности финишных способов обработки абразивными брусками / В.И. Савчук, В.А. Иванов, М.А. Телетов // Вісник Сумського державного університету. Серія Технічні науки. - 2005. - №11(83). - С. 140-145.

#### References (transliterated)

1. Adler Yu. P., Markova E. V., Granovsky Yu. V. *Planirovanie jeksperimentov pri poiske optimal'nyh uslovij* [Planning experiments in the search for optimal conditions]. Moscow: Nauka, 1976. 279 p.
2. Bondar A. G., Statyukha G. A. *Planirovanie jeksperimenta v himicheskoy tehnologii* [Planning of the experiment in chemical technology]. Kiev: Vishcha school, 1976. 184 p.
3. Dushinsky V. V., Pukhovskiy E.S., Radchenko S. G. *Optimizacija tehnologicheskikh processov v mashinostroenii* [Optimization of technological processes in mechanical engineering]. - Kiev: Technique, 1977. - 176 p.
4. Efimov V. N., Poduraev V. N. *Sovershenstvovanie rabochih processov tehnologii, metodov obrabotki rezaniem - vazhnijshij rezerv mashinostroenija* [Improving the working processes of technology, cutting techniques - the most important reserve of engineering]. Bulletin of Machine Building. 1990. No12. pp. 3 - 5.
5. Nalimov V. V., Chernova N. A. *Statisticheskie metody planirovaniya jekstremal'nyh jeksperimentov* [Statistical methods for planning extreme experiments]. Moscow: Nauka, 1965. 340 p.
6. Nosenko V. A. *Kriterij intensivnosti vzaimodejstviya obrabatyvaemogo i abrazivnogo materialov pri shlifovanii* [Criterion for the intensity of interaction between the treated and abrasive materials during grinding] Problems of machine building and machine reliability. 2001. No 5. P. 85.
7. Poletaev V. A. *Glubinnoe shlifovanie lopatok turbin: biblioteka tehnologa* [Deep grinding of turbine blades: library of a technologist] / V.A. Poletaev, D.I. Volkov. Moscow. Mechanical Engineering, 2009. 272 p.
8. Sayutin G. I., Nosenko V. A. *Shlifovanie detalej iz splavov na osnove titana* [Grinding of details from alloys based on titanium]. Moscow. Mechanical Engineering, 1987. 80 p.
9. Semko M. F., Uzunyan M. D., Yufa E. P. *Jekonomicheskoe obosnovanie vybora almaznogo kruga* [Economic justification for choosing a diamond circle]. H.: Prapor, 1971. 100 p.
10. Silin S. S., Leonov B. N., Khrulkov V. A., Lobanov A. V., Poletaev V. A., Danchenko E. B. *Osobennosti glubinnogo shlifovanija titanovyh splavov* [Features of deep grinding of titanium alloys]. Bulletin of Machine Building, 1989, №1. pp. 43-45.
11. Starkov V. K. *Shlifovanie vysokoporistymi krugami* [Grinding with high porosity wheels]. Moscow. Mechanical Engineering, 2007. 688 p.
12. Savchuk, V.I., Ivanov V.A., Teletov M.A. *Tehnologicheskie vozmozhnosti fynyshnyh sposobov obrabotki abrazivnymi bruskami* [Technological possibilities of finish ways of machining by abrasive bars] Visnyk of Sumy State University. Series: Technical Sciences. - 2005. - No. 11 (83). - pp. 140-145.

Поступила (received) 05.05.2018

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

**Ищенко Григорий Иванович (Ищенко Григорий Иванович, Ishchenko Grigoriy Ivanovich)** - ПАО «Турбоатом», м. Харків, Україна; e-mail: mikelmik@i.ua.

**Стрельчук Роман Михайлович (Стрельчук Роман Михайлович, Strelchuk Roman Mikhailovich)** - кандидат технічних наук, Українська інженерно-педагогічна академія, доцент, м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7221-031X>; e-mail: r.m.strelchuk@gmail.com.